

# 低レベル放射性廃棄物処分におけるセメント系材料の設計と 施工に関する基礎的研究

庭 瀬 一 仁

## 要 旨

低レベル放射性廃棄物のうち比較的放射能レベルの高い放射性廃棄物を対象とした余裕深度処分施設の建設がわが国で計画されている。安全性の確保には、将来世代に過度の負担をかけることなく実施されることが原則であり、ある時期からメンテナンスフリーとなることが前提となる。安全評価は、非常に長い期間、極めて多様な物理的、化学的、あるいは地球化学的な自然現象や人為的事象等が関与する。そのため、条件設定等が複雑であり、長期性のゆえに派生する不確実さも避けられない。処分施設のバリアは、人工バリアと周辺岩盤である天然バリアに大別される複数のバリアが個々に持つ長所を發揮させ弱点を補い合うことで、深刻な機能喪失を回避できるように設計し、バリアの評価では、システム全体の安全裕度を示すことが重要とされている。

埋設対象の放射性廃棄物には長期にわたり閉じ込めおよび移行抑制（放射性核種がある媒体から次の媒体に移動することの抑制）が必要な放射性核種（放射能を有する原子）が含まれることから、人工バリアと天然バリアは数万年程度の超長期耐久性の性能評価を必要とする。人工バリアは、放射性核種の移流による移行を抑えるためにベントナイト系材料を用いた低透水層、放射性核種の拡散による移行を抑制するセメント系材料を用いた低拡散層などから構成される。

低拡散層の設計要件である「放射性核種の拡散を抑制することにより漏出速度を低減すること」を定量的に評価するために、最も端的に部材の拡散性能を数値化して表していると考えられる拡散係数を指標とすることとした。低拡散層の拡散係数は、健全部と劣化による状態変化を考慮した領域を区分して、それらの面積比率で全体の等価な拡散係数を評価できると考えた。すなわち、モルタルまたはコンクリートの低拡散層部位の実効拡散係数は、①健全部の実効拡散係数、②ひび割れや打継目のような繋がりを持った空隙部、③主にセメント成分の溶脱によってセメント硬化体の空隙構造が粗くなった変質部の比率により評価できると想定するものである。まずは、低拡散性能の向上と耐久性に関係する物質移行の低減の観点から、要求性能を極力向上させることを目標として、材料の選定と配合設計を実施することとした。

健全なコンクリートには、溶解した放射性物質の拡散移行を抑制する性能がある。但し、これらの性能が期待できるのは、要求機能が得られる程度にひび割れを制御でき、物理的な形状寸法が維持できていることが前提である。メンテナンスができない地中において長期に亘りひび割れの少ないコンクリート構造物を実用レベルで構築できるか、また、地下水などの周辺物質との相互作用によるコンクリートの変質、劣化を速度論的に評価し長期耐久性を考慮した性能を安全評価に組み入

---

学位記番号と学位：第8号、博士（工学）

授与年月日：平成23年12月16日

授与時の所属：日本原燃株式会社 開発設計部

れることができるかが、セメント系材料による人工バリアの高度化の命題である。コンクリート構造物の課題を科学的、技術的に克服し、信頼性の高い人工バリアを用いて処分を行なうことは、放射性廃棄物の処分を安全に、かつ経済的に実施するために重要である。

本論文は、このような観点からこれまでに類を見ない微小な物質移行の抑制と数万年もの長期の維持を要求機能とするセメント系材料を研究対象としており、6章で構成されている。

第1章は、序論であり、本研究の背景、目的、特色および構成を示した。

第2章は、低拡散層の設計性能およびこれに関する文献調査として、低拡散層の要求機能を整理し、要点に関係する事項について文献調査を行った。それらの結果を受け、材料と配合条件を絞り込み、その上で33ケースの配合について低拡散層に用いる配合の比較検討試験を実施した。

第3章は、低レベル放射性廃棄物の埋設設備で用いるセメント系材料による人工バリアについては、既に操業中の1号および2号埋設設備を参考とすることができることから、1号埋設設備のコンクリートピットにおけるひび割れ抑制の検討経緯を概説した。

余裕深度処分のコンクリートピットについては、1号埋設設備と形態ならびに要求機能が同様であることで、所要の機能を満足する設計の実現性が高いと考えた。しかしながら、低拡散層については、無筋の高流動モルタルであることから、1号埋設設備での経験を活用しつつ、さらに高度なひび割れ抑制対策を検討し、低拡散層の実規模試験におけるひび割れ抑制を実証した。

第4章は、最初に、1) 拡散係数、2) ひび割れ、3) セメント溶脱評価が定量化され、これらを総合的に検討し低拡散層の長期性能評価を行い、安全評価で用いる低拡散層の等価の拡散係数を設定することができることについて述べ、以下に、それぞれの個別の検討について説明した。前章の実証試験で得られた力学物性、温度、ひずみ、応力などのデータをもとに温度応力解析を実施するとともに、廃棄体定置時の荷重を想定したひび割れ進展解析を実施し、低拡散層におけるひび割れ制御とひび割れ進展を検討した。また、低拡散層の物質透過性に及ぼすセメントマトリクス部の拡散特性について、トリチウムの実効拡散係数の取得試験手法や評価方法を検討するとともに、低拡散層用モルタルの拡散係数を取得し、低拡散層の物質透過性に及ぼすマトリクス部の拡散特性を検討した。さらに、以上の成果をもとにセメント成分の溶脱解析を実施し、低拡散層の溶脱を評価することにより溶脱影響領域を設定した。

第5章は、前章までの設計を安定的に満足させるための品質管理の要点と、設計の高度化案を検討した。主要な技術要件は、既往の品質管理・検査体系で管理が可能と考えられたが、フライアッシュの品質変動については、特別に品質変動影響を考慮した実験を行い、セメント系材料の安定的な使用と構築に関する品質を検討した。また、以上の機能劣化が表層から緩慢に進行することに着目し、長期の特性変化を踏まえた品質管理を容易にするための高度化設計案として、プレキャスト部材による埋設型枠の設計と評価を検討し、溶脱抑制層の設計を提案した。

第6章は、本研究で得られた成果と今後の課題に関して章毎にまとめた。

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

1. 性能比較の室内試験とその追加検討試験の結果から、低拡散層の配合として低熱ポルトランドセメントにフライアッシュ、膨張材、石灰石微粉末を使用した高流動タイプのモルタルの配合を選定し、併せて、強度特性、断熱温度上昇量、乾燥収縮、自己収縮などの諸物性を把握し、想定範囲の結果であることを確認した。
2. 実規模試験は、実際の施工環境を模擬した地下100mの試験空洞内に建設し、この時の施工性能、圧縮強度、静弾性係数、空隙構造、実効拡散係数、ひび割れの抑制効果を検討し、評価し

て、その初期性能を示した。

3. 無筋のモルタル部位である低拡散層についても、既往のコンクリートの硬化過程のひび割れ予測手法が適用可能で、ひび割れ制御についても、これらの体系上で検討することが可能であることを示唆する結果を得た。
4. 放射性核種の一つであるトリチウムを使用した拡散係数取得方法について検討し、試験条件を提示し、算出方法の説明性が向上できる手法を提案した。
5. より実際の品質管理手法への反映を目指すために、フライアッシュの品質および初期の養生方法の違いによるフレッシュ性状、強度特性および実効拡散係数への影響を確認し、本研究の変動範囲ではモルタル・コンクリートの特性に顕著な影響は及ぼさないことを明らかにした。
6. 高度化設計案として、プレキャスト部材による埋設型枠の設計と評価を検討し、溶脱抑制層の設計を提案した。

主査 月 永 洋 一

## Title Basic study on the design and construction of cementitious materials for the low-level radioactive waste disposal

Kazuhito NIWASE

### Abstract

In Japan we are planning to construct sub-surface disposal facilities for relatively high low-level radioactive waste. To ensure the safety of the facilities, we should not bequeath a huge burden to future generations, thus the facilities must be maintenance-free. The safety assessment is related to the great variety of natural phenomenon or artificial events, etc. from the physical, chemical and geochemical aspects over a long period of time. Therefore, it is complicated to set the conditions for the assessment and the uncertainties derived from the long period are unavoidable. It is important to design the barriers that avoid a serious functional loss by utilizing the individual advantage of multiple barriers (roughly classified into the engineered barrier and the natural barrier which is surrounding bedrock) and compensating their weakness. It is also important to indicate a margin of safety ratio for an entire system in order to evaluate the barriers.

It is necessary to verify the performance of the engineered and natural barriers for durability of ultra-long-term which is over tens of thousands of years, as radioactive waste for the burial disposal contains radionuclides (or radioactive atoms) that require over a long period to be confined and controlled to migrate (or to migrate from one medium to another). The engineered barrier mainly consists of a low water permeability layer and a low diffusion layer. The former is made up of bentonite material for controlling the migration of radionuclide based on advection, and the latter made up of cementitious material for controlling the migration based on diffusion.

In order to quantitatively verify the design requirement on the low diffusion layer: the leakage speed should be reduced by controlling the diffusion of radionuclides, I determined to use a diffusion coefficient as an index for the verification because it is considered as the simplest way to numerically indicate the diffusion performance of members. I deemed the diffusion coefficient of the layer can be verified by the overall equivalent value which is related to an area ratio of healthy portion and other domains that changed in state due to deterioration. And that is, I assumed the effective diffusion coefficient of the layer structured by mortar or concrete to be verifiable by using the area ratio of the diffusion coefficient of the following: (1) The healthy portions, (2) voids with linkages such as cracks or concrete joints and (3) portions altered to a porous structure of hardened cement mainly due to leaching of cementitious components. First, I conducted a material selection and mix designs to improve the required performance as much

as possible from a viewpoint of improving a low diffusion performance and reducing the material migration related to durability.

Healthy concrete has a performance of constraining the diffusion migration of dissolved radioactive substances. However, the performance is only expected under the conditions of retainable physical shapes and dimensions and controllable cracks to the allowed extent. The propositions to sophisticate the engineered barrier using cementitious materials are; whether we can build, at practical level, a concrete structure with less cracks over an extended period of time in the ground, where no maintenance is provided; whether we can incorporate the long-term durability performance into the safety assessment by kinetically verifying alteration or deterioration of the concrete properties, which is caused by the interaction with surrounding materials such as groundwater. Scientifically and technically overcoming these tasks on concrete structures will enhance the reliability of the engineered barrier, which is important to dispose of radioactive waste safely and economically.

This paper is organized into six chapters based on the standpoint above. The research subject is cementitious materials with required performance which can control the migration of unprecedented fine substances and retain for tens of thousands of years.

Chapter 1 is the introduction for describing the background, purpose, characterization and outline of the study.

Chapter 2 shows results of literature research on the design performance of the low diffusion layer and associated items by arranging the functions required on the layer and showing key functions. Consequently, materials and mixing conditions for the layer were narrowed down to 33 cases. Moreover, we carried out the experiments for those cases so as to comparatively review the mix for the layer.

Chapter 3 outlines the review process of controlling cracks on the concrete pit of No. 1 burial facility, as we can use No. 1 and 2 burial facilities currently in service as reference for the engineered barrier, which is made from cementitious materials and to be used for burial facilities for low-level radioactive waste. Regarding the concrete pit of subsurface disposal, I considered the design was likely to satisfy the required functions because of the similar configuration and functions to No. 1 burial facility. However, regarding the low diffusion layer which is made from high-flow mortar without rebar, I worked on more sophisticated crack controlling measures utilizing the experience in No. 1 burial facility and we demonstrated controlling cracks in full-size experiments.

Chapter 4 first shows the quantification of (1) diffusion coefficient, (2) cracks and (3) cement leaching evaluation, and verifies the long-term performance of the low diffusion layer by

studying the quantificational data comprehensively. Then, this chapter states that it is settable to use an equivalent diffusion coefficient for the safety assessment of the layer. Finally, the following individual review is described: Based on the data of dynamic physicality, temperature, strain, stress, etc. obtained in the demonstrative experiment as described in the previous chapters, I performed the temperature stress analysis as well as the crack development analysis by assuming loads of fixed waste body to study the control and development of cracks in the layer. In addition, I discussed experimental techniques and evaluating methods for an effective diffusion coefficient of tritium, moreover I studied the diffusion characteristics of a cement matrix portion affecting the substance permeability in the layer by determining a diffusion coefficient of mortar, which is mixed for the layer. Furthermore, based on the outcome of the work above, I set an influencing domain of leaching in the layer by evaluating the leaching analysis of the cementitious component.

Chapter 5 lists the essentials of quality control to stably meet the design described in the previous chapters and shows a plan for a more sophisticated design. Major technical requirements were considered controllable by using the existing quality control and inspection systems; still, regarding fly-ash, we conducted special experiments taking into account the influence of quality variation and reviewed the quality concerning the stable use and construction of cementitious materials. In addition, by focusing attention on the fact that functional deterioration as stated above develops sluggishly from the surface, I studied the design and evaluation of burial forms using precast members and proposed a design plan of the leaching control layer as an advanced design, which can facilitate the quality control based on long-term characteristic change.

Chapter 6 summarizes the outcomes of the study and future issues for each chapter. The results of the research are summarized in the following:

1. Based on results of the performance comparison indoor testing and the additional review testing, a mix for the low diffusion layer was selected: a high-fluidity mortar made from low-heat portland cement, fly-ash, expansive admixture and fine limestone powder. In addition, various kinds of physicality such as strength characteristics, adiabatic temperature rise amount, dry shrinkage and self shrinkage were determined, and the physicality was confirmed to be within the range of assumption.
2. As a full-size testing, a model of the practical construction environment was built in 100 m depth of an underground test cavern in disposal. From the test results, the following items were studied and verified, and then the initial performance was determined: construction performance during the work, compressive strength, static elastic modulus, void structure, effective diffusion coefficient, and crack control effect.

3. The existing technique to predict the concrete cracks in the curing process was also applicable for the low diffusion layer made from non-rebar mortar. The result indicates that crack control for the layer can be studied on these systems.
4. Methods for determining a diffusion coefficient by using tritium (or one of radionuclides) were studied. Moreover, testing conditions were presented and a technique that enhances to explain the calculation methods was proposed.
5. In order to reflect the outcomes of the study closer to the actual quality control technique, the effects on the following characteristics due to the variances of the quality and initial curing method of fly-ash were confirmed: fresh properties, strength characteristics and effective diffusion coefficient. Finally, it was consequently clarified that mortar concrete characteristics were not significantly affected within the variation of the study.
6. I studied the design and evaluation of burial forms using precast members and proposed a design plan of the leaching control layer as an advanced design.

Professor (Chairperson)

Youichi Tsukinaga

